

Title of the Invention

光学系の設計方法、光学系および投影露光装置

Background of the Invention

本発明は、マイクロデバイス（半導体素子、撮像素子、液晶表示素子、薄膜磁気ヘッド、CCD素子等）を製造するためのリソグラフィ工程中で使用される投影露光装置、該投影露光装置に好適な光学系、該光学系を設計する際に好適な光学系の設計方法に関するものである。

近年、集積回路のパターンの微細化が進むに従い、投影露光装置で使用する露光光源の波長は年々短波長化してきている。このため、次世代の集積回路パターンの露光技術として、露光光源にEUV (Extreme Ultra Violet) 光を用いた露光方法が有望視されている。EUVの波長は数nm~50nmであり、この波長域で屈折材として十分光学系を形成しうる程の透過率を有する物質は存在しないため、光学系は反射面のみで構成されることになる。反射面のみで結像系を設計した例としては、米国特許第5,815,310号公報に開示されているものがある。

Summary of the Invention

ところで、EUV光を対象光源とする反射面には、EUV用の特殊な反射膜を形成することが必要になる。なぜならば、通常、反射面の基盤材質となる単純な金属やガラスの光沢面では、EUVはほとんど反射しないからである。

EUV用の反射膜は、可視光用のダイクロイックミラーに用いられている膜とは異なり、非常に多数の薄膜を積層したものになるため、一般に非常に厚いものとなる。代表的なEUV用反射膜としては、モリブデン (Mo) とシリコン (Si) を交互に重ねたものがある。この膜で波長13nmの光に対し70%程度の反射率を得ようとする、Mo層とSi層を40~50ペア積層しなければならない。1ペアの厚みは約7nmなので、反射膜の厚さは300~350nmにもなる。

このように波長の20倍以上もある厚い膜となるため、通常、実効的な反射面

は、基盤表面とは大きく異なることになる。しかも、反射膜に対する光線の入射角によっても、実効的な反射面の位置が異なる。

しかしながら、従来では、全てこの膜の影響を無視し、基盤表面で光線が反射するとした設計方法が採用されてきた。従来提案されてきたEUV投影光学系の設計解もこのような設計方法で求められたものであった。これは、従来では、収差に影響を与えるほど膜によって光路長が変化することを考慮していなかったためである。

そこで、本発明は、表面に膜が形成された面を有する光学系において、膜を考慮した場合でも、必要な光学的性能を確保することを目的とする。

上記課題を解決するために、本発明の第1の観点によれば、表面に膜が形成された面を有する光学系の設計方法であって、前記膜に関するデータを準備する第1工程と、前記光学系に関するデータを準備する第2工程と、前記第1工程及び前記第2工程で準備されたデータに基づいて、前記膜を含めて前記光学系の光学的波面を計算する第3工程とを含む、光学系の設計方法が提供される。

表面に膜が形成された面を有する光学系について、従来は膜を含めずに設計解を求めていたが、本発明では膜を含めて光学的波面を計算することにより、設計条件を実際の光学系に大きく近づけることができ、必要な光学的性能を確保することができる。

その際に、前記第3工程で得られた前記光学的波面の計算結果に基づいて、前記膜に関するデータ及び前記光学系に関するデータのうちの少なくとも一方を最適化する第4工程をさらに含むことが好ましい。

本発明の別の観点によれば、上記設計方法により設計された光学系が提供される。また、本発明の別の観点によれば、光学系の設計プログラムが記録されている記録媒体であって、上記設計方法を含む設計プログラムを含むものが提供される。また、本発明の別の観点によれば、光学系の設計プログラムを含む信号を搭載しており、かつコンピュータで受信可能な搬送波であって、上記設計方法を含む設計プログラムを含む信号を有するものが提供される。

本発明の第2の観点によれば、表面に膜が形成された面を有する結像光学系の設計方法であって、前記膜を含めずに前記結像光学系の光学的波面を計算する第

1 の工程と、前記膜を含めて前記結像光学系の光学的波面を計算する第 2 の工程と、前記第 1 の工程と前記第 2 の工程との計算結果を比較する第 3 の工程と、前記第 2 の工程で算出される前記波面収差が前記第 1 の工程で算出される前記波面収差より小さくなるように設計する第 4 の工程とを含む、光学系の設計方法が提供される。

この方法は、膜の厚みや特性が性能に無視できないほどの影響を与える光学系を設計する場合に有効である。特に波長の短い EUV 光等を光源とする光学系では、通常、波長の何倍もの厚みがある膜を含むため、好適な方法といえる。また、第 1 の工程を踏むことにより、光学系の特性の把握、概ねの性能の確保等、概略設計をしておくことができる。第 2 工程以降で、細かな膜データを入力して最終設計をすることができるので、効率的に設計作業を行うことができる。

本発明の第 3 の観点によれば、光学系であって、表面に膜が形成された面を含み、そこにおいて、前記膜を含めて算出される前記光学系の波面収差が、前記膜を含めずに算出される前記光学系の波面収差よりも小さくなるように設計されているものが提供される。

かかる構成によれば、膜を含めた状態で最適化が行われた、高性能の光学系を提供することができる。その際に、前記光学系は、結像光学系であってもよい。あるいは、アフォーカル系や集光系等、他の種類の光学系であってもよい。また、前記膜が形成された面は、反射面であってもよく、この場合は反射膜を考慮することになる。前記光学系は EUV 放射のもとで用いられる光学系であってもよく、このような光学系では、通常、波長の何倍もの厚みがある膜を含み、膜の厚みや特性が性能に無視できないほどの影響を与えるため、好適である。また、EUV 光のような短波長の光を対象光源とする光学系では、許容される収差量が小さく、高い光学性能を必要とするため、有効である。

前記光学系は、設計波長を λ としたとき、前記膜を含めずに算出される前記光学系の波面収差は前記膜を含めて算出される前記光学系の波面収差よりも、 $RM S$ で $\lambda / 14$ 以上大きいような光学系としてもよい。前記光学系において、前記波面収差の算出時に P 波と S 波の平均を用いてもよい。

本発明の第 4 の観点によれば、投影原版に設けられたパターンの縮小像をワー

ク上に投影露光する投影露光装置であって、前記投影原版を照明する照明光学系と、上記記載の光学系とを含み、そこにおいて、前記光学系の物体面上に前記投影原版を配置可能とし、かつ前記光学系の像面上に前記ワークを配置可能としたものが提供される。

かかる構成によれば、膜を含めた状態で最適化が行われた、高性能の光学系を用いて、パターンの像をワーク上に投影露光することができるため、微細な回路パターンを高解像に形成することが可能となる。

本発明の第5の観点によれば、投影原版に設けられたパターンの縮小像をワーク上に投影露光する投影露光方法であって、上記光学系を準備する第1工程と、該光学系の物体面上に前記投影原版を準備する第2工程と、前記投影原版を照明する第3工程と、前記光学系の像面上に前記ワークを準備する第4工程と、前記光学系を通して前記パターンの縮小像を前記ワーク上に形成する第5工程とを含むものが提供される。

本発明の第6の観点によれば、表面に膜が形成された面を有する結像光学系の設計プログラムが記録されている記録媒体であって、前記膜を含めずに前記結像光学系の光学的波面を計算する第1の工程と、前記膜を含めて前記結像光学系の光学的波面を計算する第2の工程と、第1の工程と第2の工程の計算結果を比較する第3の工程と、第2の工程で算出される波面収差が第1の工程で算出される波面収差より小さくなるように設計する第4の工程とを含む設計プログラムが記録されているものが提供される。

本発明の第7の観点によれば、表面に膜が形成された面を有する結像光学系の設計プログラムを含む信号を搭載しているコンピュータで受信可能な搬送波であって、前記膜を含めずに前記結像光学系の光学的波面を計算する第1の工程と、前記膜を含めて前記結像光学系の光学的波面を計算する第2の工程と、第1の工程と第2の工程の計算結果を比較する第3の工程と、第2の工程で算出される波面収差が第1の工程で算出される波面収差より小さくなるように設計する第4の工程とを含む設計プログラムを含む信号を搭載しているものが提供される。

Brief Description of the Drawings

図1は、本発明の実施の形態に係る光学設計の手順を示すフローチャートであり、
図2は、本発明の実施の形態に係る光学系の光路図であり、
図3は、図2の光学系の設計解データの実例を数値で示す図であり、
図4は、図3のデータの続きを示す図であり、
図5は、図2の光学系の膜厚分布データの実例を数値で示す図であり、
図6は、図2の光学系の膜を含めない場合のPSFであり、(a)はそのcontour map、(b)はその鳥瞰図であり、
図7は、図2の光学系の膜を含めた場合のPSFであり、(a)はそのcontour map、(b)はその鳥瞰図であり、
図8は、本発明の実施の形態に係る投影露光装置の構成図であり、
図9は、従来の設計方法で設計された光学系の光路図であり、
図10は、図9の光学系の設計解データの実例を数値で示す図であり、
図11は、図10のデータの続きを示す図であり、
図12は、図9の光学系のPSFであり、(a)はそのcontour map、(b)はその鳥瞰図であり、
図13は、図9の光学系の膜厚分布データの実例を数値で示す図であり、
図14は、図9の光学系の膜を含めた場合のPSFであり、(a)はそのcontour map、(b)はその鳥瞰図であり、
図15は、図9の光学系のM12面のみに膜を含めた場合のPSFであり、(a)はそのcontour map、(b)はその鳥瞰図である。

Detailed description of the preferred embodiment

以下、図面に基づいて本発明の実施の形態を詳細に説明する。図1は本発明の実施の形態に係る、表面に膜が形成された面を有する光学系の設計方法を説明するフローチャートである。図1を参照しながら、この設計方法の手順について説明する。

まず、膜を含めずに所定の仕様に合わせて光学系を設計し、光学的波面を計算し、波面収差を算出する(S10)。この工程で光学系のタイプ検討、各タイプの特性把握、概ねの性能の確保等、概略設計をするようにしてもよい。次に、形成

すべき膜を設定し、その膜を含めて光学系を設計し、光学的波面を計算し、波面収差を算出する(S20)。この工程で膜の設計を行うようにしてもよい。そして、S10とS20の計算結果を比較する(S30)。

なお、S10及びS20における設計とは、光学系及び／又は膜を構成する各パラメータ(データ)を最適化することを含む。

S20で算出された波面収差がS10で算出された波面収差より小さければ、設計解として認め、次の段階の検討に入る。S20で算出された波面収差がS10で算出された波面収差より大きい場合はS20に戻り、膜を含めた光学系を設計し直す(S40)。この工程で波面収差を比較する際、単純な大小比較ではなく、ある基準値を設けて、S10で算出された波面収差とS20で算出された波面収差の差が、その基準値より大きいかな否かで判断するようにしてもよい。基準値としては例えば、RMS値で $\lambda/14$ としてもよい。

一般に、無収差の光学系とは、物体上の一点から様々な方向に発した光線が、像上の一点に収斂する光学系のことである。これは同時に、共役な2点を結ぶ複数の光線の光路長が等しいことを意味する。実際には、一定の視野内で全く無収差となる光学系は実現不可能であるため、ある程度の光路長差は許容される。その程度は、光学系の用途により異なるが、一般に波面収差と呼ばれる光路長差のばらつきを考えた時、そのRMS(Root Mean Square)が波長 λ の $1/14$ 程度であれば、ほぼ無収差とされる。

ここで、基準値としては、RMS値で $\lambda/20$ とすることがさらに好ましい。

S10とS20で光学的波面を計算する際、P波とS波の問題がある。反射面に対して光が斜入射した場合、P波とS波では実効的反射面が若干異なり、P波とS波の位相差を光学設計で縮めることは不可能である。1つの方法として、P波とS波の平均を用いて、光学的波面を計算するようにしてもよい。

なお、S20で算出された波面収差がS10で算出された波面収差より大きい場合はS20に戻るとしたが、場合に応じて、S10まで戻って設計してもよい。また、ここでは、S40で比較する物理量を波面収差としたが、MTF(Modulation Transfer Function)等、他の物理量を用いたり、併用してもよい。さらに、光学系によっては、S10の工程を省いて設計

してもよい。上述の設計方法は結像系だけでなく、アフォーカル系や集光光学系等、様々な光学系に適用可能である。

図2は上記の方法で設計された結像光学系の光路図である。この光学系は、8つの非球面形状の反射面を有し、これらの反射面を介して第1面R上の物体を第2面W上に結像させるための結像光学系である。EUV光を対象光源とし、各反射面にはEUV用の反射膜が施されている。各反射面にはW側からR側に向かって光路の順にM1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8の符号が付されている。

図3, 図4にこの光学系の設計解データを示す。データにおいて、 r は曲率半径、 d は次の面までの間隔、 A, B, C, D, E, F は以下の式で定義される非球面係数である。

$$Z = \frac{h^2}{r \left\{ 1 + \sqrt{1 - \frac{h^2}{r^2}} \right\}} + Ah^4 + Bh^6 + Ch^8 + Dh^{10} + Eh^{12} + Fh^{14}$$

ここで、 Z ：平面からのサグ量

h ：光軸からの高さ

である。この光学系のW側開口数（NA）は0.25で、W面における視野は半径25～27mmの円環領域で、M7有効径が開口絞りを兼ね、W側がテレセントリックな光学系になっている。

ところで、EUV用反射膜は、角度特性が厳しく、光線の入射角が想定した角度と異なると、所定の反射率が得られない。そのため、光学系の性能を確保するためには、EUV用反射膜は膜厚に分布をつけることが必要になる。膜厚分布は、通常、製作時の制御の容易さから回転対称となるようにつけられることが多い。

ここで、EUV用反射膜は0.033nm厚のMo層、0.067nm厚のSi層を交互に50ペア積層した膜を基本とし、 $C_0 + C_2 h^2 + C_4 h^4 + C_6 h^6 + C_8 h^8 + C_{10} h^{10}$ をかけたものを実際の膜の厚さとした。 h は光軸からの高さ、 $C_0 \sim C_{10}$ は面毎に異なる係数である。図5に各面に対する係数の値を示す。

図6はこれらの反射膜を含めずに算出された、すなわち、基盤面を反射面とした場合の、この光学系の波長13.4nm、W上での高さ26mmにおけるPSF (Point Spread Function) である。図6(a)はPSFのcontour mapであり、図6(b)はPSFの鳥瞰図である。ピーク値は0.4766である。これを波面収差に換算すると、そのRMSは0.123λとなり、従来の概念で判断すれば、設計解として認められるレベルではない。

図7は上記の反射膜を含めて算出された、この光学系のPSFであり、膜を含むこと以外は図6のものと同条件である。図7(a)はPSFのcontour mapであり、図7(b)はPSFの鳥瞰図である。ピーク値は0.9162である。これを波面収差に換算すると、そのRMSは0.046λとなり、半導体集積回路露光機として使用するには支障の無い光学系といえる。

図8は、図2に示した結像光学系を投影光学系PLとして、投影露光装置に適用した場合の装置の構成図である。ここでは、図2の第1面Rを物体面、図2の第2面Wを像面として扱っている。なお、物体面と像面は共役な関係にあるため、両者を交換しても結像関係は保たれる。

投影光学系PLの物体面には、所定の回路パターンが形成された投影原版としてのレチクルRが配置され、投影光学系PLの像面には、ワークとしてのフォトリジストが塗布されたウエハWが配置されている。レチクルRはレチクルステージRS上に保持され、ウエハWはウエハステージWS上に保持されている。レチクルRの上方には、露光光源としてのEUV光源を含み、レチクルRを均一に照明するための照明光学装置ISが配置されている。

照明光学装置ISから供給される露光光は、レチクルRを照明する。照明されたレチクルRのパターンの像は、投影光学系PLを介して投影倍率で縮小されてウエハW上に露光され、転写される。

次に、従来の設計方法で設計したEUV用結像光学系を比較例として示す。

図9は従来の設計方法で設計した、EUV用結像光学系の光路図である。この光学系は、8つの非球面形状の反射面を有し、これらの反射面を介して第1面R上の物体を第2面W上に結像させるための結像光学系である。実際には各反射面

に膜が形成されることになるが、設計時では膜は考慮されていない。各反射面にはW側からR側に向かって光路の順にM1 1, M1 2, M1 3, M1 4, M1 5, M1 6, M1 7, M1 8の符号が付されている。

図10, 11に、この光学系の設計解データを示す。データにおいて、 r は曲率半径、 d は次の面までの間隔、 A, B, C, D, E, F は前述の式で定義される非球面係数である。この光学系のW側開口数(NA)は0.25で、W面における視野は半径25~27mmの円環領域で、M1 7有効径が開口絞りを兼ね、W側がテレセントリックな光学系になっている。

図12に、膜を考慮しないまま、この光学系の光学的波面を計算して求めた、波長13.4nm、W上での高さ26mmにおけるPSFを示す。図12(a)はPSFのcontour mapであり、図12(b)はPSFの鳥瞰図である。PSFのピーク値は0.9999である。これは波面収差のRMSが0.0016λ程度であることを意味し、この値から、ほとんど無収差の光学系といえる。

ところで、実際に使用するためには、この光学系にEUV用の反射膜を塗布することになる。ここでは、0.033nm厚のMo層、0.067nm厚のSi層を交互に50ペア積層した膜を基本とした。これに、 $C_0 + C_2 h^2 + C_4 h^4 + C_6 h^6 + C_8 h^8 + C_{10} h^{10}$ をかけたものが実際の膜の厚さとなる。ここで、 h は光軸からの高さ、 $C_0 \sim C_{10}$ は面毎に異なる係数である。図13に各面に対する係数の値を示す。

次に、図13に示した膜厚分布データを有するEUV用反射膜を含めてこの光学系の光学的波面を計算する。図14は、この場合のPSFであり、膜を含むこと以外は図12のものと同条件である。図14(a)はPSFのcontour mapであり、図14(b)はPSFの鳥瞰図である。図14は、図12と同じ縮尺で描かれたものであるが、一見してわかるように、図12に比べてピークが低くなり、裾野が広がっている。図14におけるPSFのピーク値は0.4973である。これは波面収差のRMSが0.11λ程度であることを意味し、半導体集積回路露光機としてはもはや使用に耐えられないレベルである。

上記のような、膜を含めない場合と含めた場合とを比較した際に現れる顕著な

性能差は、M1 2の面で発生していることがわかっている。図1 5は、この光学系において、M1 2のみ膜があり、他の面は膜が無く基盤面で反射するとし、その他は図1 4と同条件とした場合のPSFである。図1 5 (a)はPSFのcontour mapであり、図1 5 (b)はPSFの鳥瞰図である。図1 5と図1 4を比較すると、これら2つの図は極めて似ており、M1 2の面が多大な影響を与えていることがわかる。

一方、M1 1, M1 2は、同様の仕様で設計すれば、異なる設計者であっても、ほぼ同じような設計解となることがわかっている。よって、上記の現象はこの一例特有のものではなく、同様の仕様の設計解であれば、ほぼ同様の結果となる。

以上のように比較例では、半導体集積回路露光機としてはもはや使用に耐えられないレベルである。

なお、このような膜による性能劣化を避けるために、膜の設計を変更して、膜を含めない場合と、膜を含めた場合の評価結果が大差ないようにすれば良いと考えられるが、前述したようにEUV用反射膜は、波長の何倍もの厚みのある膜でなければ所定の性能を発揮できないため、EUV用光学系では、この2つの場合に大差が生じないように設計するのは極めて困難である。

以上、詳細に説明したように、表面に膜が形成された面を有する光学系において、従来は膜を含めずに設計解を求めていたところ、本実施形態では膜を含めて光学的波面を計算し設計解を求めることにより、設計条件を実際の光学系に大きく近づけることができ、必要な光学的性能を確保することができる。特に、EUV光等の短波長の光を光源とし、波長の何倍もの厚みがある膜を含むような光学系に有効である。このようなEUV投影光学系における反射膜の厚みは波長の20倍以上もある。前述したようにこの反射膜における実効的な反射面は基盤表面とは大きく異なる。そして、実効的な反射面の位置は、反射膜の厚みの範囲内、すなわち波長の20倍以上の範囲内で変わり得る。前述したように無収差光学系と見なせる波面収差の許容範囲($\lambda/14$)を念頭におくと、本実施形態が有効であることが理解される。

また、本実施形態によれば、膜を含めた状態で最適化が行われた高性能の光学系を用いて、パターン像をワーク上に投影露光することができ、微細な回路パ

ターンを高解像に形成可能である投影露光装置を提供できる。

以上、添付図面を参照しながら本発明にかかる好適な実施形態について説明したが、本発明はかかる例に限定されないことは言うまでもない。当業者であれば、特許請求の範囲に記載された技術的思想の範疇内において、各種の変更例または修正例に想到し得ることは明らかであり、それらについても当然に本発明の技術的範囲に属するものと了解される。

以上、詳細に説明したように、表面に膜が形成された面を有する光学系において、従来は膜を含めずに設計解を求めていたところ、本発明では膜を含めて光学的波面を計算し設計解を求めることにより、設計条件を実際の光学系に大きく近づけることができ、必要な光学的性能を確保することができる。特に、EUV光等の短波長の光を光源とし、波長の何倍もの厚みがある膜を含むような光学系に有効である。また、本発明の別の観点によれば、膜を含めた状態で最適化が行われた高性能の光学系を用いて、パターンの像をワーク上に投影露光することができ、微細な回路パターンを高解像に形成可能な投影露光装置を提供できる。